

反応度総和計算法と遅発中性子データへのフィードバック

愛知淑徳大学

親松 和浩

e-mail: oyak@asu.aasa.ac.jp

1. まえおき

原子炉制御では核分裂生成物(FP)から放出される(β)遅発中性子を利用する。原子炉動特性を決定する主要な遅発中性子データは、

$\bar{\nu}_d$: 1核分裂あたり遅発中性子がいくつ放出されるか、

$\lambda_d(t)$: 核分裂後の時間の関数としてどのように放出されるか

である。これらの遅発中性子データは、核分裂後の遅発中性子放出を直接測定したり、原子炉出力の変化から算出する間接測定によって評価され、現象論的パラメータとして扱われてきた。

遅発中性子はFPの β 崩壊に伴って放出される中性子である。遅発中性子を放出することのできるFPを遅発中性子先行核と呼ぶ。遅発中性子データは総和計算法によって評価できる物理量である。総和計算法はFPの核分裂収率と崩壊データを用いてFPの生成と崩壊を計算するものであり、原子炉崩壊熱評価ではすでに実用の域に達している。

ENDF/B-VIに収録されている遅発中性子データの評価には総和計算が初めて用いられた。しかし、すでに報告されている通り、従来の評価値に比べて明らかにおかしな振る舞いをするのが分かっている[1]。

この研究ではFPの生成と崩壊を追う総和計算法によって原子炉動特性を直接評価する初めての試みを行う。この報告では反応度を漸近炉周期の関数として与える逆時間方程式に着目し、反応度の式をFP総和計算により計算することになる。そこで、この方法を反応度総和計算法と呼ぶことにする。

以下では、ENDF/B-VIのFPの核分裂収率と崩壊データを用いて反応度総和計算を行い、ENDF/B-VIの遅発中性子データの特異性の原因を探る。

2. 遅発中性子データと6群近似

遅発中性子放出の時間依存性は実用上次のような6群近似式であらわす。

$$n_d(t) = \bar{v}_d \sum_j^6 \alpha_j \lambda_j \exp(-\lambda_j t), \quad \left(\sum_j^6 \alpha_j = 1 \right) \quad (2.1)$$

ここで、 α_j と λ_j は j 群のそれぞれ相対収率と崩壊定数である。原子炉の動特性計算のために評価される遅発中性子データは、 \bar{v}_d 、 α_j と λ_j である。

ENDF/B-VI では、 α_j と λ_j の値を $n_d(t)$ の総和計算結果にフィットして評価するという初めての試みを行った。総和計算は高速中性子に対して行われ、熱中性子の場合にもこの α_j 、 λ_j の値を使う。なお、 \bar{v}_d については、総和計算値の不確かさの方が大きいとして従来の評価値を採用している。

総和計算では、 \bar{v}_d と $n_d(t)$ が次のように与えられる。

$$\bar{v}_d = \sum_i^{allFP} Y_i P_{ni} \quad (2.2)$$

$$n_d(t) = \sum_i^{allFP} Y_i P_{ni} \lambda_i \exp(-\lambda_i t) + (\text{decay chain effect}) \quad (2.3)$$

ここで、 Y_i 、 P_{ni} 、 λ_i はそれぞれ FP i の累積核分裂収率、遅発中性子放出確率(分岐比)、崩壊定数である。式(2.3)の decay chain effect は、(遅発中性子) 先行核が、核分裂によって直接生成されるだけでなく、親核の(β)崩壊によっても生成されることによる。この項の値は大きくはないが無視できる程小さいわけではない。

3. 動特性方程式

炉出力 $p(t)$ に関する逆解析法の微積分方程式を利用する。

$$\frac{d p}{d t} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} p(t) + \int_{-\infty}^t du \frac{p(u)}{\Lambda} \frac{n_d(t-u)}{\bar{v}} \quad (3.1)$$

\bar{v} : average number of total neutrons emitted after a pulse fission

$\beta = \bar{v}_d / \bar{v} \ll 1$.

k : neutron multiplication = (neutron production) / (neutron loss)

$\rho = (k - 1) / k$: reactivity

$\Lambda = 1 / k$: mean neutron generation time

通常、逆解析法では delayed neutron kernel を用いるが、式(3.1)では遅発中性子放出率 $n_d(t)$ を用いる。この方程式は、6群近似を用いた場合と同様に、ラプラス変換を使って形式的に解くことができる。逆時間方程式(反応度 ρ と漸近炉周期 T の関係)は、

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} dt \exp(-t/T) m_d(t)}{\bar{v} T} \quad (3.2)$$

となる。ここで、

$$m_d(t) = \int_{-\infty}^0 du n_d(t-u) \quad (3.3)$$

は、 $t < 0$ で 1 fission/s の核分裂率で無限時間照射した場合（図 1）の遅発中性子放出率である。これは系が $t < 0$ で臨界状態にあったことに対応している。

特に興味深いのは $T \rightarrow \infty$ ($\rho \rightarrow 0$)での漸近形である。

$$\rho = \frac{N}{\bar{v} T} \quad (3.4)$$

ここで、

$$N = \int_0^{\infty} dt m_d(t) \quad (3.5)$$

は無限照射後の遅発中性子放出数である。

4. 遅発中性子総和計算の結果と重要な先行核

総和計算により逆時間方程式（式(3.2)）を計算し、良く用いられる Tuttle の 6 群近似パラメータ[2,3]を用いた場合と比較した。総和計算には著者の開発したパソコン用 FP 総和計算コード[4]を用いた。反応度総和計算結果は、ENDF/B-VI の 6 群パラメータの場合と同様に、長炉周期でかなりの過小評価を与える。この 6 群パラメータは、ENDF/B-VI 作成中の予備的な核分裂収率と崩壊データを用いて総和計算により評価された。したがって、ENDF/B-VI の 6 群計算と今回の結果の原因は、ENDF/B-VI の FP データにあると推定できる。

図 2 では $T \rightarrow \infty$ での極限值が過小評価の良い目安を与える。式(3.4), (3.5)から、具体的には無限照射後の遅発中性子放出数 N に着目すれば良いことが分かる。 N は各先行核からの放出数の総和として計算でき、どの先行核が N にどの程度寄与するかを調べることができる（図 3）。この図から、 ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{87}Br が反応度に 60-80%の寄与を与えていることが分かる。どの核分裂システムでも ^{137}I が一番大きな寄与を与え、 ^{88}Br も ^{87}Br と同程度の寄与を与える。従来はこのような定量的な評価はできず、 ^{137}I の重要性に気付かなかった。ただ漠然と長炉周期では半減期の一番長い ^{87}Br が最も重要であると考えられてきたのである。

次に、図 2 の過小評価の原因を $m_d(t)$ の時間依存性からも検討し原因となる遅発中性子先行核を絞り込むことを試みた。逆時間方程式(3.2)で、反応度が $m_d(t)$ の Laplace 変換に比例するからである。具体的には、Tuttle の 6 群パラメータを使った場合と総

和計算の差、

$$\Delta m_d(t) = m_d^{Tuttle}(t) - m_d^{SUM}(t) \quad (4.1)$$

を考える。簡単のため、この差が1つの遅発中性子先行核で説明できるとする。すなわち、

$$\Delta m_d(t) = c \exp(-\lambda t) \quad (4.2)$$

と置く。ここで、 λ はこの先行核の崩壊定数である。式(4.2)で $t \times \Delta m_d(t)$ のグラフは $t=1/\lambda$ で最大値をとる。したがって、グラフの最大値を与える t の値から先行核の半減期 $(\ln 2)/\lambda$ を算出することができる。

この方法を用いて、 ^{235}U 、 ^{238}U の高速核分裂について反応度の過小評価のと原因となる先行核を推定した。高速核分裂に限ったのは ENDF/B-VI の6群パラメータが高速核分裂について導出されたからである。なお、 ^{239}Pu については図2に示したように Tuttle とのずれが十分小さいので除外した。図4に ^{235}U の結果を示す。36.7秒のピークは半減期25.4秒に対応する。従ってこのずれの主要部分は半減期24.5秒の ^{137}I で十分説明できる。 ^{238}U では、ピークから算出された半減期が20.5秒となる。この場合、候補となる先行核は ^{137}I 、あるいは ^{88}Br (半減期16.5秒) と ^{136}Te (17.5秒) となる。

5. 核分裂収率と崩壊データの精度

反応度総和計算の特異性の原因となる FP データの特定のため、 ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{87}Br 、 ^{136}Te の核分裂収率と崩壊データの精度を吟味する。ここで ^{87}Br も含めたのは前節で見た通り N への寄与が大きいからである。これらの4核種では、半減期の精度は十分良い。不確かさは1%、あるいはそれ以下である。したがって、前節の半減期を利用した $m_d(t)$ の時間依存性の議論は十分成立する。

時間依存性 $m_d(t)$ (瞬時照射) について要請される(相対)精度は5%である[5]。簡単のため、すべての半減期(崩壊定数)が十分良い精度で知られており、また親核の崩壊による生成項(decay chain effect)は無視できるとする。この場合、式(2.3)を簡単化して

$$(dP_n/P_n)^2 + (dY/Y)^2 = (5\%)^2$$

という関係を考えることができる。さらに、核分裂収率の方が評価し難いことを考えると、

$$dP_n/P_n = 3\%, \quad dY/Y = 4\%$$

という要求精度の目安を考えることができる。

先にあげた4先行核の P_n の精度は、未だ不十分である。特に最も重要な ^{137}I の不確かさは6%もあり強く改善が望まれる。 P_n 値の不確かさからの影響を除くためには最重要3先行核、 ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{87}Br の精度を2%にすることが望まれる。 ^{136}Te につ

いては遅発中性子放出数が比較的少ないため5%程度の精度でよいであろう。

現在これらのPn値の精密測定は可能な段階にあり、測定による精度向上が強く望まれる。核分裂収率の精度はPnの精度よりもかなり悪い。しかし、Pn値は β 崩壊の分岐比として核分裂収率の評価にも使われるので、Pn値の精度向上は核分裂収率の精度向上にも役に立つのである。

6. 結 論

原子炉動特性を、核分裂生成物の生成崩壊をから直接計算するという初めての試みを行った。総和計算により求めた逆時間方程式は、ENDF/B-VIの6群パラメータを用いた場合と同様、長い炉周期で反応度をかなり過小評価する結果を得た。この原因を探るため長炉周期極限での各先行核の寄与割合を調べ、主要3先行核 ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{87}Br が反応度の60~80%を与えることが分かった。特に、最重要先行核は ^{137}I であり、従来考えられていた ^{87}Br ではない。さらに、遅発中性子放出の時間依存性の吟味から、総和計算の特異性の原因は ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{136}Te のPnまたは核分裂収率に問題があると結論した。総和計算を実用化するには、これら3核種と ^{87}Br のPnの精密測定により、Pnの不確かさの影響をまず取り除くことが必要である。具体的には $d\text{Pn}/\text{Pn}$ を ^{137}I 、 ^{88}Br 、 ^{87}Br については2%、 ^{136}Te については5%にすることが望まれる。

[1] D.G.Spriggs, Nucl. Sci. Eng. 114, pp. 342-351, 1993.

[2] R.J. Tuttle, INDC(NDS)-107/G+Special (1979).

[3] R.J. Tuttle, Nucl. Sci. and Eng. 56, (1975) 37-71.

[4] K. Oyamatsu, Proc. 1998 Symp. on Nucl. Data, JAERI-Conf 99-002, pp. 234-239, 1999.

[5] J. Rowlands, private communication.

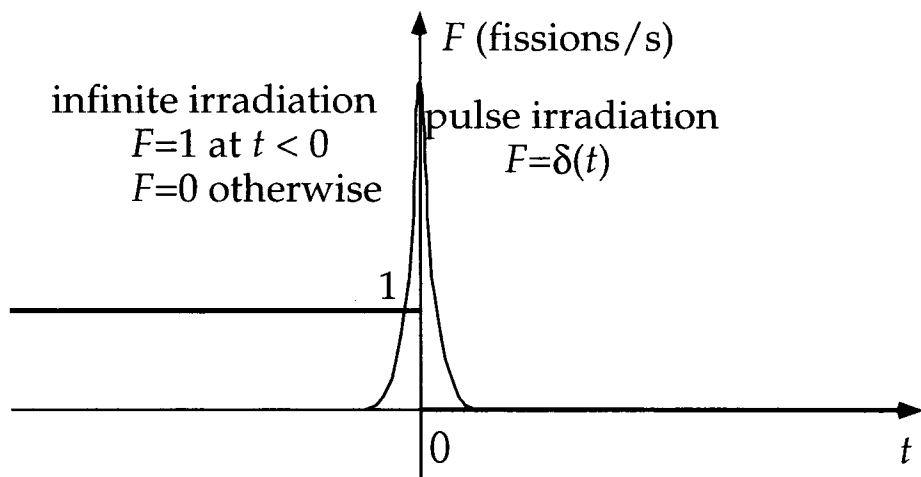


図1. 無限照射と瞬時照射。

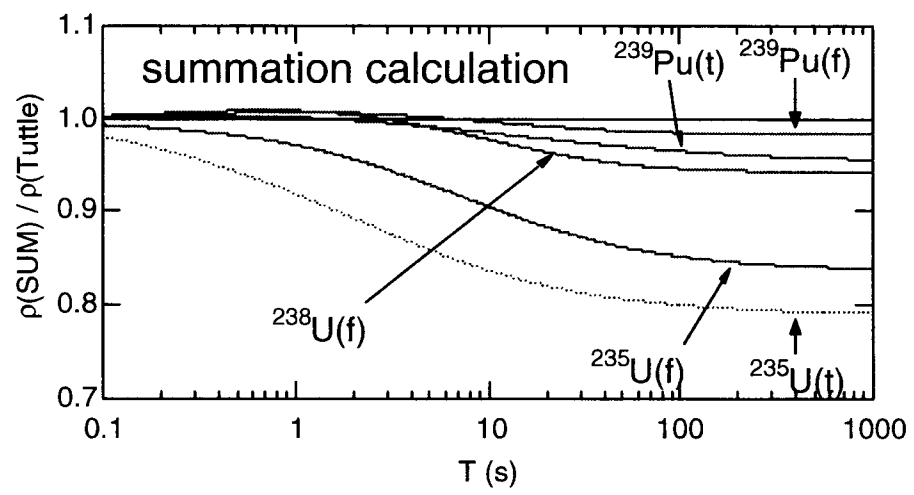


図2. 総和計算と Tuttle の 6 群近似式を用いた逆時間方程式の比較。
 この図では β 単位の反応度を比べた。

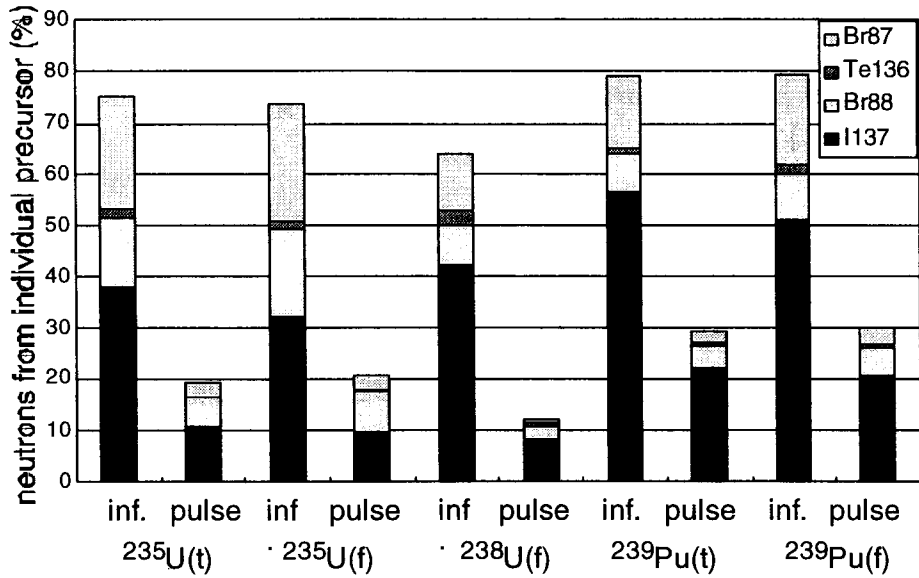


図3. 無限照射(inf.)および瞬時照射(pulse)における遅発中性子放出数の内訳。これらはそれぞれ、 N と $\bar{\nu}_d$ に対応する。下から ^{137}I , ^{88}Br , ^{136}Te , ^{87}Br の寄与を表す。

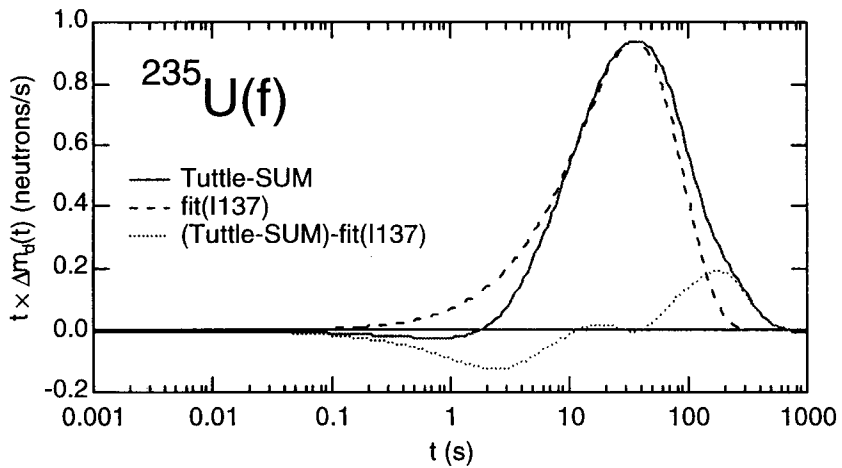


図4. 無限照射後の遅発中性子放出率 $m_d(t)$ のずれ。図には ^{137}I の半減期を使って式(4.2)でフィットした結果をあわせて示してある。